

ИННОВАЦИИ В ПРОГРАММЕ НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС». ЧАСТЬ II

АВТОРЫ:

СОФЬИН В.В.
ОАО «РОССЕТИ»

СЕЛЕЗНЕВ В.Ю.
ОАО «ФСК ЕЭС»

КАПУСТИН Д.С.
ОАО «ФСК ЕЭС»

ШАКАРЯН Ю.Г.,
Д.Т.Н., ПРОФ.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

НОВИКОВ Н.Л.,
Д.Т.Н., ПРОФ.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Целью инновационного развития электросетевого комплекса России является создание интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью

Мы продолжаем обсуждение плана инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС», осуществляемого в рамках программы НИОКР на 2013–2018 гг. [1]. Основными целями программы

являются разработка и внедрение современных высокотехнологичных решений, обеспечивающих надежное и энергоэффективное функционирование всего электросетевого комплекса страны.



НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Накопители электроэнергии являются ключевыми элементами интеллектуальной энергетической системы (ИЭС) с активно-адаптивной сетью (ААС). Мощные энергоёмкие накопители (в качестве промежуточных устройств между источниками генерации энергии и потребителем) позволяют освободиться от жесткого требования постоянного соответствия генерации энергии ее потреблению. Они помогают существенно снизить потери электроэнергии за счет выравнивания графиков нагрузки и повысить устойчивость демпфирования колебаний.

В 2012 г. Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН) в качестве головного исполнителя разработал, изготовил и провел экспериментальные исследования гибридного накопителя энергии (ГНЭ-100) на базе литий-ионных аккумуляторов и наборных суперконденсаторов [2]. Особенность этого устройства – сочетание аккумуляторной батареи и батареи суперконденсаторов. Разработанный гибридный накопитель энергии ГНЭ-100 состоит из трех модулей:

- батареи литий-ионных аккумуляторов ЛИБ-100;
- батареи суперконденсаторов БСК-100;
- блока согласования с сетью УСС-100.

Подсистема накопления состоит из аккумуляторного накопителя энергии (использовалась батарея на основе литий-ионных аккумуляторов системы LiFePO₄ производства ООО «НПО ССК») и суперконденсаторного накопителя энергии (батареи наборных суперконденсаторов производства НПО «Технокор»). Каждый из накопительных блоков

содержит также системы: а) защиты, б) контроля и в) мониторинга параметров батарей.

Для определения функциональных возможностей опытного образца гибридного накопителя мощностью не менее 100 кВт и энергоёмкостью 100 кВт·ч были проведены экспериментальные исследования. Для этих работ был разработан специальный испытательный стенд, включающий автономный источник электроэнергии (ГТЭ) мощностью до 1,5 МВт, набор активных и реактивных нагрузок и необходимую коммутационную и измерительную аппаратуру.

Испытания ГНЭ-100 продемонстрировали следующие преимущества разработанной гибридной схемы:

- ток заряда и разряда аккумуляторной батареи характеризуется плавным нарастанием и спадом, что благоприятно сказывается на системе балансировки: происходит выравнивание напряжений аккумуляторных элементов;
- компенсация кратковременных возмущений сети возможна без подключения аккумуляторной части;
- возможность формирования кратковременного форсированного режима накопителя с выдачей мощности, в два раза превышающей номинальную.

Результаты проведенных испытаний подтвердили основные свойства разработанной системы и показали, что:

- разработанные программа и методика испытаний опытного образца секции ГНЭ-100 позволяют

ИНФОРМАЦИЯ

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ОАО «ФСК ЕЭС»

Программа инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС» до 2016 г. с перспективой до 2020 г. предназначена для разработки, испытания и внедрения на объектах ЕНЭС прорывных (создающих новые рынки и новые категории продукции) и улучшающих (позволяющих проводить модернизацию существующих сетей с улучшением параметров их функционирования) инновационных технологий.

Целевыми результатами реализации Программы НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС» являются создание интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) и обеспечение устойчивого инновационного развития Единой национальной электрической сети (ЕНЭС). Программа выделяет семь приоритетных направлений, среди которых разработка концепции и теоретических основ создания интеллектуальной энергетической системы ИЭС ААС; системы управления ИЭС ААС; системы мониторинга и защиты электрических сетей от внешних воздействий и др.

ИНФОРМАЦИЯ

УСТРОЙСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КЗ

Устройства предназначены для ограничения уровней токов КЗ и сохранения живучести электроэнергетических систем при высокой плотности нагрузки. В схемах питания мегаполисов эти проблемы особо актуальны, поскольку токи КЗ в этих схемах уже превышают коммутационные способности существующих выключателей. Устройства ограничения токов КЗ делятся на две группы: неуправляемые устройства с неглубоким уровнем ограничения токов КЗ; управляемые устройства глубокого ограничения токов КЗ, обладающие высоким быстродействием и большим сопротивлением в режимах КЗ.

К первым устройствам относятся токоограничивающие реакторы, обладающие сравнительно низкой стоимостью и нашедшие широкое практическое применение. В последнее время большое значение приобретают быстродействующие устройства глубокого токоограничения, обладающие в нормативных режимах малым (в идеале нулевым) сопротивлением, а при КЗ – требуемым.

– корректно оценить в реальных условиях эксплуатации технические характеристики как изделия в целом, так и его отдельных подсистем; при периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5, 10 с в диапазоне от 0 до 100 кВт с помощью суперконденсаторов происходит стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки компенсируются полностью и без подключения аккумуляторной части накопителя; при периодическом изменении нагрузки с периодом более 10 с в диапазоне от 0 до 100 кВт обеспечивается стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети с помощью аккумуляторных батарей. Таким образом, возмущающие воздействия нагрузки указанного спектра также компенсируются полностью; при периодическом изменении нагрузки с периодом 1, 2, 5, 10, 100 с в диапазоне от 0 до 100 кВт стабилизация перетоков активной и реактивной мощности из сети происходит с помощью гибридного накопителя. При этом возмущающие воздействия нагрузки высокочастотного спектра (с периодом 1–10 с) компенсируются с помощью суперконденсаторов, а возмущающие воздействия нагрузки низкочастотного спектра (с периодом более 10 с)

– компенсируются с помощью аккумуляторных батарей; в случае отключения сети (режим источника бесперебойного питания) ГНЭ-100 обеспечивает устойчивое электропитание потребителя с заданным уровнем напряжения локальной нагрузки.

Алгоритм работы ГНЭ-100 создает рекуперативный режим работы, т. е. компенсация возмущений происходит за счет заряда суперконденсаторной батареи, происходящий во время сброса нагрузки.

ГНЭ-100 способен создавать режим кратковременного двукратного увеличения максимальной мощности путем параллельной работы батарей аккумуляторов и суперконденсаторов.

В настоящее время начаты работы по созданию подобных накопителей с энергосистемами 1000 кВт·ч и мощностью 1000 кВт для объектов ОАО «ФСК ЕЭС».

ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В современных электрических сетях существенно возрастают уровни токов короткого замыкания (КЗ). Особенно актуальна эта проблема для электрических сетей мегаполисов. В ряде случаев уровни токов КЗ могут превысить отключающую способность современных выключателей (63 кА). Поэтому наряду с различными схмотехническими решениями (секционированием и др.) разрабатываются различного рода устройства глубокого ограничения токов КЗ – особые токо-

ограничительные устройства (ТОУ), предназначенные для ограничения не только стационарных, но и пиковых значений токов КЗ.

Общие технические требования, предъявляемые к современным ТОУ, могут быть сформулированы следующим образом. Эти устройства должны:

- обладать достаточным быстродействием: время перехода в режим ограничения тока с момента возникновения тока КЗ не более 2–3 мс;
- обеспечивать ограничение ударного и установившегося тока до допустимых значений или заданного уровня;
- не вносить существенных нелинейных искажений в параметры сети, прежде всего в нормальном режиме ее работы;
- не оказывать заметного влияния на нормальный режим работы сети, особенно в случае нормального режима работы;
- обеспечить стабильные характеристики при изменении схемы сети;
- не оказывать отрицательного влияния на функционирование других элементов сети и систем защиты;
- иметь систему автоматического срабатывания и восстановления после устранения тока КЗ.

Следует отметить, что ОАО «ФСК ЕЭС» признало и приняло основные технические решения, предлагаемые российскими разработчиками, по развитию технологий и устройств токоограничения для сетей напряжением 220 кВ. Одним из таких решений стал проект, предложенный ОИВТ РАН, по созданию таких

ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛЬНОГО РЕАКТОРА И ВЗРЫВНЫХ КОММУТАТОРОВ



Рис. 1

- 1 – взрывной коммутационный элемент
- 2 – плавкий коммутационный элемент
- 3 – система управления
- 4 – резистор
- 5 – плавкий коммутатор
- 6 – индуктор

устройств на основе специального реактора и быстродействующих коммутаторов взрывного типа. Для пилотного внедрения этого проекта была выбрана подстанция «Каскадная» 500 кВ МЭС Центра. Это новая подстанция, предназначенная для электроснабжения северо-восточных районов Москвы. То, что эта ПС еще находится в стадии проектирования и строительства, позволило внести изменения в общую электрическую схему и объединить токоограничивающего устройства.

На основании предварительных расчетов были сформулированы следующие требования к ТОУ-220:

- мгновенное значение тока включения (срабатывания) 8 кА;
- глубины токоограничения 10 кА;
- реактивное сопротивление реактора 12,7 Ом;

- время перехода в режим токоограничения не более 3 мс с момента подачи команды на включение.

В разработке технических требований к ТОУ-220 принимали участие специалисты ОАО «ФСК ЕЭС», ОИВТ РАН, ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», ЗАО «СЭТ», ОАО «Энергосетьпроект». Проектом предусмотрено пофазное исполнение ТОУ-220. Стендовые испытания ТОУ-220 выполнены в Центре по испытаниям и сертификации ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». В качестве источника энергии использовались два ударных генератора типа ТИ-100. Испытания подтвердили правильность принятия технических решений.

В настоящее время разработаны технические решения, обеспечивающие существенное снижение строительного объема токоограничителя на высоковольтных коммутаторах взрывного типа примерно

Рис. 2.
ВТСП – кабельная линия на
стенде ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



до 2,5–3,0 м³ на фазу, что даст возможность реализовать его многократное включение, т. е. реализовать режим АПВ. Технические параметры ТООУ-220 на основе быстродействующих коммутаторов взрывного типа позволяют утверждать, что именно эти устройства могут быть наиболее перспективными для применения глубокого токоограничения в сетях всех классов напряжения. Внедрение ТООУ на ПС 500 кВ «Каскадная» намечено на 2016 г.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Современный этап развития нашего общества характеризуется тем, что, с одной стороны, резко повышаются требования к экологическим и ресурсосберегающим характеристикам производства и распределения электроэнергии. А с другой стороны, технологический прогресс

подразумевает постоянное увеличение эффективности выработки электроэнергии и ее транспортировки к потребителю. В определенной степени эти требования являются противоречивыми, и удовлетворить их возможно только с использованием наиболее передовых и прогрессивных технологий. Особый интерес в этом смысле представляют технологии, основанные на явлении высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Как известно, устройства, использующие эту технологию, работают в температурном диапазоне, соответствующем состоянию жидкого азота. Такие устройства способны работать при охлаждении дешевым и легкодоступным компонентом, каким является азот.

В настоящее время во многих странах активно разрабатываются различные типы электротехнических устройств на основе технологии ВТСП: трансформаторы, моторы, генераторы, токоограничители и силовые кабели. Последние являются наиболее проработанным применением сверхпроводимости

в электроэнергетике. Основными преимуществами таких кабелей являются следующие:

- высокая эффективность – в связи с малыми потерями энергии в сверхпроводнике;
- возможность замены существующего кабеля на кабель с большей передаваемой мощностью при тех же габаритах;
- пониженный вес – за счет меньшего количества используемого материала;
- увеличение жизненного цикла кабеля вследствие замедления процессов старения изоляции;
- низкий импеданс и большая критическая длина;
- отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния, экологическая чистота и пожаробезопасность;
- возможность передачи больших мощностей при сравнительно низком напряжении.

Рис. 3.
Криогенная установка для
испытаний ВТСП – кабельных
линий (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»)



Высокотемпературные сверхпроводящие кабельные линии (ВТСП КЛ) постоянного и переменного тока являются инновационной разработкой, позволяющей решить значительную часть проблем современных электрических сетей. Однако при использовании ВТСП КЛ постоянного тока возникает принципиально новое качество передачи, так как линия становится управляемым элементом сети, регулирующим потоки передаваемой энергии вплоть до реверса передачи.

В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного тока. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения. Окончательный выбор определяется как техническими, так и экономическими соображениями.

ВТСП КЛ переменного тока целесообразны в тех случаях, когда необходима передача больших потоков электроэнергии на распределительном напряжении, а также при замене воздушных линий на кабельные. Возможна также передача

энергии непосредственно с шин генератора в распределительную сеть.

ВТСП КЛ постоянного тока, выполняя те же функции, что и ВТСП КЛ переменного тока, способны дополнительно осуществлять функцию ограничения токов КЗ и управления потоками мощности. Поэтому в тех случаях, когда, помимо передачи больших потоков мощности на низком напряжении, требуется еще обеспечить и функции ограничения токов КЗ и управления потоками мощности (что характерно для мегаполисов), ВТСП КЛ постоянного тока более предпочтительны. Кроме того, сверхдальние кабельные передачи возможны только при использовании линий постоянного тока. Именно поэтому в передовых странах (США, Ю. Корея, Китай, Япония, Германия, Франция и др.) в настоящее время проводятся активные работы по созданию и опытной эксплуатации таких линий электропередачи для различных целей.

В России по инициативе РАО ЕЭС, а затем ОАО «ФСК ЕЭС» ведутся

работы, целью которых является создание ВТСП КЛ как постоянного, так и переменного тока на напряжение 20 кВ. Линия переменного тока длиной 200 м будет установлена на опытную эксплуатацию в Москве на ПС 110 кВ «Белорусская». Линия постоянного тока длиной 2,5 тыс. м соединит две подстанции в Санкт-Петербурге: ПС 330 кВ «Центральная» и ПС 220 кВ «РП-9». Обе кабельные линии будут иметь номинальную мощность передачи 50 МВт. При реализации этих проектов предусматривается как создание собственно сверхпроводящей кабельной линии, так и всей необходимой инфраструктуры: криогенной станции, токовых вводов, соединительных муфт, преобразовательных подстанций, систем диагностики, управления и защиты. Для обеих линий разработаны коаксиальные конструкции кабелей с двумя ВТСП-проводниками. При таких конструкциях прямой и обратный токи (или токи в проводнике и экране) протекают только по сверхпроводящим жилам и экранам, что обнуляет омические потери энергии в кабеле. Электромагнитное поле этих кабе-

ИНФОРМАЦИЯ

ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

Температура, осадки, атмосферное давление, влажность, скорость и направление ветра являются важными параметрами, определяющими функционирование линий электропередачи. В целом по России считается, что ежегодные потери электросетевого комплекса РФ от неблагоприятных погодных явлений составляют более 5 млрд руб.

лей сосредоточено только внутри сечения самого кабеля. Отсутствие полей рассеяния и использование в качестве пропиточного состава жидкого азота делают такие кабели экологически чистыми и существенно снижают требования к условиям прокладки кабельной трассы.

В обозримом будущем мощные сверхпроводящие кабельные линии электропередачи позволят сформировать энергетическую сеть с передачей электроэнергии на сверхдальние расстояния, выполнять межсистемные связи, «дробить» при необходимости сложные энергосистемы, строить протяженные подводные линии и пр. Сверхпроводящие кабели также могут быть использованы как дополнительные линии транспортировки энергии в трубопроводных линиях сжиженного газа или водорода. За счет использования «бесплатного» холода в таких трубопроводах дополнительный поток энергии может передаваться с помощью сверхпроводящих кабелей, проложенных непосредственно в транспортных трубопроводах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ОБЪЕКТЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА

В рамках НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС» «Моделирование воздействия опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений на объекты электросетевого комплекса, включая проведение анализа альтернативных прогнозов погоды и подготовку предложений по совершенствованию системы реагирования на штормовые предупреждения» разработаны концепция, архитектура, техническое задание и технико-экономическое обоснование системы мониторинга и прогнозирования природных явлений (далее – Система), а также создан прототип Системы.

Система предназначена для оперативно-диспетчерского персонала структурных подразделений ОАО «ФСК ЕЭС» (САЦ, ГЦУС, ЦУС, диспетчерских служб подстанций и воздушных линий). Система должна способствовать принятию решений в ходе управления работой энергообъектов за счет своевременного обеспечения персонала текущей и достоверной информацией о метеорологической и иной обстановке на территории расположения объектов электроэнергетики. Прототип Системы в настоящее время позволяет проводить мониторинг следующих явлений: направление и скорость ветра, гололедно-изморозевые отложения, грозовая деятельность, осадки, температура воздуха и пожары.

Прототип Системы метеомониторинга позволяет собирать, накапливать и отображать на рабочих местах пользователей существенную информацию о текущем состоянии погоды в районе объектов электроэнергетики.

Для прогноза погоды в прототипе Системы используется подсистема прогнозирования погодных явлений, основанная на использовании специализированных мезомасштабных моделей (COSMO-RU, WRF), имеющих высокую степень детализации прогноза (точность до 2 км, в перспективе – до 1 км), с заблаговременностью до 72 часов.

Подсистема прогноза на основе мезомасштабной модели COSMO-RU разрабатывается совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России». Подсистема прогноза на основе мезомасштабной модели WRF разрабатывается в сотрудничестве с геофаком МГУ им. М. В. Ломоносова.

К настоящему моменту разработаны следующие мезомасштабные модели возникновения и развития опасных и неблагоприятных явлений природы:

- прогноз возникновения сильного ветра;
- прогноз образования гололедно-изморозевых отложений и отложений мокрого снега (размеры, вес, ветровые нагрузки при гололеде);
- прогноз появления опасно низких и высоких температур;
- прогноз возникновения опасных сочетаний низких температур и скорости ветра.

В настоящий момент прототип Системы и модели прогноза возникновения и развития опасных

и неблагоприятных явлений природы находятся в стадии опытной эксплуатации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

По заказу ОАО «ФСК ЕЭС» в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» была проведена работа по исследованию проводов нового поколения для воздушных линий электропередачи в районах с большими гололедно-ветровыми нагрузками. По результатам этих работ в ТД «Ункомтех» совместно с ОАО «Кирскабель» были изготовлены образцы проводов нового поколения – компактированного провода с композитным сердечником марки АКУ 400/65 (температура длительно допустимой эксплуатации 90 °С) и высокотемпературного компактного провода марки АТКУ 400/65 (температура длительно допустимой эксплуатации 150 °С).

Были проведены испытания систем «провод – зажим» по определению их механических, электрических и тепловых характеристик. Установлено, что провода нового поколения, в т. ч. с композитным сердечником, по сравнению с проводом АС (по ГОСТ 839–80) одинакового сечения токопроводящей части имеют следующие преимущества:

- уменьшение внешнего диаметра провода на ~10%;
- снижение массы провода на ~19,5%;
- повышение разрывной прочности на ~40%;
- снижение коэффициента линейного удлинения на ~15%;
- увеличение длины проле-

та при одинаковой стреле провеса на ~11,5%;

- снижение количества промежуточных опор на 10 км линии на ~14%;
- увеличение предельной токовой нагрузки (повышение пропускной способности) на ~71%.

Результаты испытаний показали, что наряду с увеличением пропускной способности ВЛ применение проводов нового поколения позволяет при строительстве новых ВЛ существенно уменьшить капиталовложения (в расчете на 1 МВт передаваемой мощности), так как при увеличении длины пролета снижается количество промежуточных опор.

Кроме того, в рамках данной работы были исследованы покрытия, препятствующие образованию наледи на проводе. Сформулированы технические требования к антигололедному покрытию, разработаны метод его нанесения на провода, а также программа и методика лабораторных испытаний нанесенного покрытия для определения его эффективности по отношению к образованию наледи.

Были испытаны опытные образцы антигололедного покрытия ОС-56–22, удовлетворяющего техническим требованиям. Испытания подтвердили как способность покрытия препятствовать образованию наледи на проводе, так и достаточную стойкость к механическому истиранию.

По результатам выполнения работы было установлено, что для проводов с антиобледенительными покрытиями, в том числе наноразмерными супергидрофобными, возможно определенное замедление образования гололедных отложений на проводе в зависимости от выбора типа покрытия. Однако полного исключения вероятности их об-

разования такие провода не обеспечивают. При этом эффективные свойства антигололедного покрытия держатся в течение пяти-семи лет. При необходимости покрытие может быть повторно нанесено на провод методом напыления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье изложен далеко не полный перечень работ по созданию инновационного оборудования и технологий, выполняемых различными организациями по программе НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС».

Основная стратегия внедрения результатов НИОКР заключается в том, что наряду с точечным практическим применением новых видов техники и технологии необходимо приступить к их комплексному внедрению в масштабах РЭС, ОЭС. Именно такой подход позволит получить синергетический эффект от практического применения новых инновационных решений. Этот путь развития сегодня реализуется при создании интеллектуальной электроэнергетической системы ОЭС Востока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Софьин В. В., Селезнев В. Ю., Капустин Д. С., Шакарян Ю. Г., Новиков Н. Л. Инновации в программе НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС». Часть I // Энергия единой сети, 2013, №3 (8). – С. 18–25.
2. Бердников Р. Н., Фортвов В. Е., Сон Э. Е., Денщикова К. К., Жук А. З., Новиков Н. Л., Шакарян Ю. Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети, 2013, №2 (7). – С. 40–53.
3. Шурупов А. В., Козлов А. В., Фортвов В. Е., Бердников Р. Н., Шакарян Ю. Г., Сон Э. Е. Токоограничители на основе быстродействующих коммутаторов // Энергия единой сети, 2013, №2 (7). – С. 54–65. ■